

## ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕМІСІЙ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА БУДІВНИЦТВІ ПІВДЕННИХ РЕГІОНІВ ПОЛЬЩІ

*Abstract.* Mathematical models of greenhouse gas emissions caused by fuel combustion in industry and construction in southern regions of Poland are presented with an added spatial component. The described algorithms are implemented to create corresponded software using geographic information systems. Numerical experiments of spatial inventory of greenhouse gases were carried out for voivodeships of Malopolskie, Opole, Silesia and Lower Silesia, the structure of total emissions of greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) has been analyzed for different types of fossil fuel.

*Keywords:* spatial modeling, greenhouse gas inventory, industry and construction, fossil fuel.

*Анотація.* Представлено математичні моделі процесів емісії парникових газів з просторовою компонентою, що спричинені спалюванням палива в промисловості та будівництві південних регіонів Польщі. Описані алгоритми програмно реалізовано за допомогою геоінформаційної системи. Здійснено числові експерименти з просторової інвентаризації парникових газів для Малопольського, Опольського, Сілезького та Нижньосілезького воєводств; проаналізовано структуру сумарних емісій парникових газів CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O по окремих видах палива.

*Ключові слова:* просторове моделювання, інвентаризація парникових газів, промисловість і будівництво, викопне паливо.

*Вступ.* Якісне оцінювання емісій парникових газів є важливою проблемою в реалізації міжнародних зобов'язань щодо скорочення цих емісій. Міжнародна група експертів зі зміни клімату розробила методологію для проведення інвентаризації парникових газів. Ці методи є універсальними і тому не повною мірою враховують регіональну специфіку, що веде до збільшення похибки інвентаризації [1,4]. Зважаючи на це, необхідно розробляти такі підходи, які б враховували регіональні особливості та індустріальний рівень розвитку країн. Тому актуальним є розроблення математичних моделей та відповідних програмних засобів для оцінювання емісії на регіональному рівні. Для західних областей України проведено просторову інвентаризацію в промисловості та будівництві [1]. На жаль, для південної Польщі, де характерне скупчення найбільших підприємств, – ні.

*Метою цієї роботи* є розроблення моделей і програмних засобів для здійснення просторової інвентаризації парникових газів від спалювання

---

<sup>4</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

палива для потреб промисловості та будівництва південних регіонів Польщі.

Польська промисловість, незважаючи на великі родовища кам'яного вугілля та іншої сировини, все ж таки відчуває досить сильну нестачу нафти та природного газу, тому це паливо імпортують з інших держав. На виготовлення одиниці валового внутрішнього продукту бруutto витрачається в 2-4 рази більше енергії, ніж у високорозвинених державах. Причиною цього є те, що польська промисловість функціонує тільки за рахунок тісного зв'язку з важкою промисловістю (гірничодобувна, металургійна), а також застаріле обладнання та технології виробництва. Промисловість Польщі використовує в основному кам'яне та буре вугілля [3].

*Вхідні дані*, які використано при просторовому моделюванні емісій: обсяги споживання паливно-енергетичних ресурсів для окремих адміністративних одиниць (воєводств, повітів, гмін) [6-8], а також – обсяги валового внутрішнього продукту, кількість квадратних метрів житла, зданого в експлуатацію [3]; нетто теплотворні значення для різних сортів палива [5]; коефіцієнти емісій парникових газів у розрізі окремих категорій діяльності – промисловості та будівництва [5]; цифрові карти адміністративного поділу та землекористування [2].

*Спалювання палива у промисловості*. До цієї категорії відносять емісії, пов'язані із спалюванням викопного палива для виробництва промислової продукції. Детальні дані про обсяги споживання палива кожною галуззю промисловості неможливо виділити із щорічних статистичних збірників, які публікують органи статистики. Такі дані узагальнено по видах палива для усіх категорій і подано у збірниках, як сумарні річні показники витрат палива на виробництво промислової продукції.

Розроблено модель для просторового аналізу емісії парникових газів у промисловості, яка враховує регіональні показники валового внутрішнього продукту відповідних адміністративних одиниць та розташування промислових територій в їх межах.

Алгоритм здійснення інвентаризації емісії парникових газів у промисловості південних регіонів Польщі розбито на наступні кроки:

1) загальновоєводські дані про обсяги спожитого виду палива на виробництво промислової продукції розподіляють по адміністративних одиницях (повітах, гмінах) за деякими показниками, що характеризують цей розподіл, наприклад, пропорційно параметру «валовий внутрішній продукт у розрізі гмін або повітів»;

2) обчислення емісій парникових газів з використанням узагальнених коефіцієнтів емісій парникових газів при виробництві промислової продукції;

3) із загальної території адміністративної одиниці виділяють територію, на якій ведеться різного роду промислова діяльність – це території зайняті фабриками, промисловими об'єктами та складами, звалищами, незавершеними будовами тощо; наступним кроком є прив'язування отриманих емісій парникових газів до цих територій.

Множину ділянок, на яких ведеться промислова діяльність визначають з цифрової карти землекористування наступним чином:

$$\Delta = (C^{urban;f} \cup D^{urban;;f} \cup I^{unit} \cup D^{sites}), \quad (1)$$

де  $C^{urban;f}$  та  $D^{urban;;f}$  – відповідно, території, зайняті цілком або частково міськими будівлями в даному повіті;  $I^{unit}$  – промислові чи комерційні підрозділи в повіті;  $D^{sites}$  – різного виду звалища.

Після розподілу палива по джерелах емісії парникових газів на рівні окремої елементарної ділянки можна представити таким чином:

$$E_{i,G}^{Industry} = \sum_{f=1}^{\Phi} \sum_{a=1}^A [F_{i,a,f} \cdot K_{a,f,G}], \quad i = \overline{1, I}, G = \overline{1, G_{GHG}}, \quad (2)$$

де  $E_{Industry}^G(\delta)$  – емісії  $G$ -го газу від промислової діяльності в  $i$ -й елементарній ділянці;  $F_{i,a,f}$  – дані щодо  $a$ -го виду промислової діяльності в  $i$ -й елементарній ділянці;  $K_{a,f,G}$  – коефіцієнт емісії  $G$ -го парникового газу від  $a$ -го виду промислової діяльності та  $f$ -го палива;  $A$  – кількість видів промислової діяльності;  $I$  – кількість елементів множини  $\Delta$ ;  $G_{GHG}$  – кількість парникових газів;  $\Phi$  – кількість видів палива.

Якщо були б наявні дані про обсяги спаленого палива по видах промислової діяльності, то оцінювання емісій проходило би за виразом (2). Оскільки такі дані відсутні, то потрібно слідувати за описаним вище алгоритмом:

$$E_{i,G}^{Industry} = (V_g S_i) / (V_w S_g) \sum_{f=1}^{\Phi} K_{f,G} T_f P_{w,f}, \quad i = \overline{1, I}, G = \overline{1, G_{GHG}}, \quad (3)$$

де  $E_{i,G}^{Industry}$  – емісії  $G$ -го парникового газу від промислової діяльності в  $i$ -й елементарній ділянці;  $P_{f,w}$  – кількість спожитого  $f$ -го палива у відповідному воєводстві;  $V_g$  – обсяги валового внутрішнього продукту в розрізі гмін за певний рік,  $g = \overline{1, \Gamma}$ , де  $\Gamma$  – кількість гмін у воєводстві;  $V_w$  – сума валового внутрішнього продукту в конкретному воєводстві у цьому році;  $K_{f,G}$  – коефіцієнт емісії конкретного парникового газу при спалюванні  $f$ -го палива;  $T_f$  – нетто теплотворні значення палива;  $S_i$  – площа  $i$ -ї елементарної ділянки, а  $S_g$  – площа всіх промислових ділянок у  $g$ -й гміні.

*Спалювання палива в будівництві.* До цієї категорії відносять емісії парникових газів, пов'язані зі спалюванням та переробкою палива. Точні дані про обсяги використаного палива виділити важко, адже вони подаються як сумарні для будівництва та промисловості. Тому їх визначають для кожного воєводства пропорційно до певного показника.

Алгоритм здійснення інвентаризації емісії парникових газів у будівництві південних регіонів Польщі розбито на наступні кроки:

1) загальновоєводські дані про обсяги спожитого палива розподілено по гмінах відносно показника, який характеризуватиме розподіл, наприклад, кількість квадратних метрів житла, зданого в експлуатацію в поточному році;

2) обчислено емісії парникових газів з використанням узагальнених коефіцієнтів емісій парникових газів;

3) територію гмін розбито на елементарні ділянки для подальшого сумування результатів.

Після розподілу палива оцінку емісій парникових газів на рівні окремої елементарної ділянки можна представити таким чином:

$$E_{i,G}^{Construct} = (m_p S_i) / (M_w S_p) \sum_{f=1}^{\Phi} P_{f,w} \cdot K_{f,G} T_f, \quad i = \overline{1, I_c}, G = \overline{1, G_{GHG}}, \quad (4)$$

де  $E_{i,G}^{Construct}$  – емісії  $G$ -го парникового газу від промислової діяльності в  $i$ -й елементарній ділянці;  $P_{f,w}$  – кількість спожитого  $f$ -го палива у відповідному воєводстві;  $m_p$  – кількість метрів квадратних житла, зданого в експлуатацію за певний рік у конкретному повіті чи гміні;  $M_w$  – сума метрів квадратних житла, зданих в експлуатацію у цьому році у відповідному воєводстві;  $I_c$  – кількість елементарних ділянок, де було будівництво;  $S_p$  – площа ділянок, де було будівництво, в межах повіту.

З метою отримання сумарних емісій від різних категорій діяльності досліджувану територію розбивають сіткою до певного рівня, і в межах кожної її клітинки сумують емісії.

*Програмна реалізація та числові експерименти.* Для реалізації описаних вище моделей просторової інвентаризації емісій парникових газів та автоматизації побудови відповідних цифрових карт створено набір підпрограм на мові MapBasic, що враховують вказані параметри інвентаризації, наприклад, території дослідження, розмір комірки сітки розбиття на елементарні об'єкти, категорії діяльності, рівень інвентаризації та додаткові параметри, специфічні для обраного сектору. Ці підпрограми використовують вхідну інформацію, яку сформовано у вигляді Excel-таблиць:

- таблиці щодо споживання паливно-енергетичних ресурсів для окремих адміністративних одиниць (воєводств, повітів, гмін), а також з інформацією про обсяги валового внутрішнього продукту по відповідних воєводствах, кількість квадратних метрів житла, зданого в експлуатацію тощо;
- таблиці нетто теплотворних значень для різних сортів палива;
- таблиці коефіцієнтів емісій парникових газів у розрізі окремих категорій діяльності – промисловості та будівництва.

Як результати отримано сумарні та георозподілені питомі емісії

парникових газів. Питомі емісії парникових газів – величини, які встановлюють залежність між обсягами емісій парникових газів в атмосферу і площею території, на якій їх емітовано.

Для прикладу на рис. 1 наведено відповідно цифрову карту розподілу питомих емісій закису азоту в Опольському воєводстві у результаті спалювання кам'яного вугілля (кг/км<sup>2</sup>). Ця карта містить інформацію про питомі емісії на рівні елементарних ділянок, де ведеться промисловість.

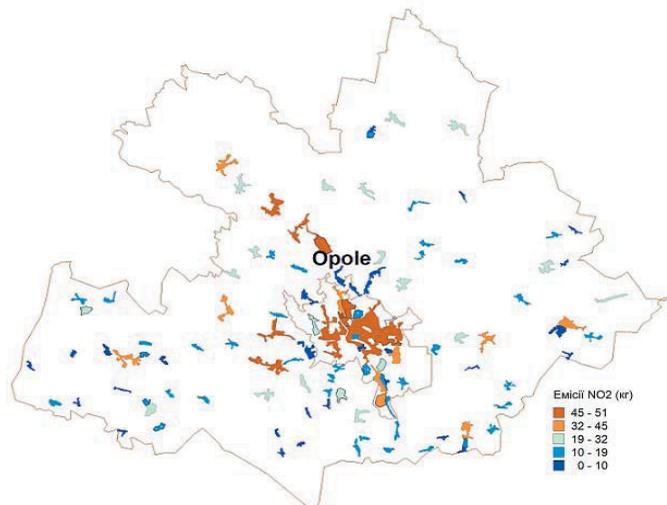


Рис. 1. Питомі емісії закису азоту від спалювання кам'яного вугілля у промисловості Опольського воєводства (кг/км<sup>2</sup>), 2010

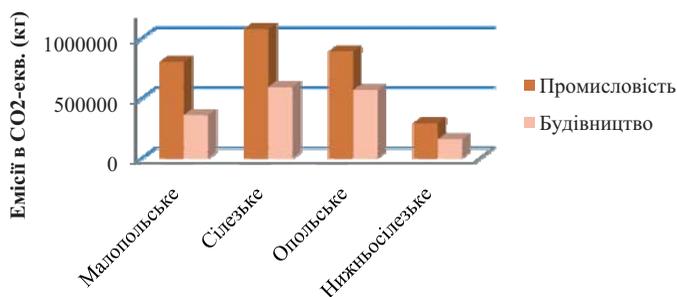


Рис. 2. Результати проведення інвентаризації парникових газів для південного регіону Польщі, 2010

Найбільші емісії парникових газів в еквіваленті CO<sub>2</sub> спостерігаються в Сілезькому воєводстві, тому що це є один з найбільш промислово розвинутих районів у Польщі. У кожному з досліджуваних воєводств найбільша частка емісій парникових газів припадає на промисловий сектор. Дещо нижчий

рівень емісій  $\epsilon$  в будівництві. На рис. 2 співставлено результати проведення інвентаризації парникових газів у промисловості та будівництві у вигляді гістограм для Малопольського, Опольського, Сілезького та Нижньосілезького воєводств.

*Висновки.* У статті описано розроблені математичні моделі та алгоритми просторового аналізу процесів емісії парникових газів, які програмно реалізовано у середовищі MapBasic окремо для промисловості та будівництва. Це дало можливість отримати просторово-розподілені кадастри емісій  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  у південній Польщі, а також сумарні емісії для адміністративних одиниць – повітів та гмін.

Результати просторової інвентаризації наочно ілюструють внесок кожної окремо взятої елементарної ділянки в загальні емісії парникових газів, дають змогу виявити території, де зосереджені найбільші джерела емісії парникових газів, а також досліджувати структуру емісій по категоріях джерел. Одержані розподілені оцінки емісій можуть бути використаними при плануванні та впровадженні заходів щодо зниження емісій парникових газів там, де вони є найбільшими.

*Подяка.* Ця робота виконана в рамках проекту GESAPU (Marie Curie Project n°247645 FP7-PEOPLE-2009-IRSES): „Геоінформаційні технології, просторово-часові підходи та оцінювання повного вуглецевого балансу для підвищення точності інвентаризацій парникових газів” (2010-2014).

1. Бунь Р. А. Інформаційні технології просторової інвентаризації парникових газів у енергетичному секторі та аналіз невизначеності / Р.А.Бунь, Х.В.Бойчук, А.Р.Бунь, М.Ю.Лесів. – Львів : ПП Сорока Т., 2012. – 464 с.
2. Карта землекористування Corine land cover 2006 [Електронний ресурс] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-clc2006-100-m-version-12-2009>.
3. Główny Urząd Statystyczny. Bank danych lokalnych. Układ wg klasyfikacji NTS: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: [http://www.stat.gov.pl/bdlen/app/dane\\_podgrup.hier?p\\_id=42429&p\\_token=-949617506](http://www.stat.gov.pl/bdlen/app/dane_podgrup.hier?p_id=42429&p_token=-949617506).
4. IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds).
5. Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO<sub>2</sub> (WE) w roku 2005 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2008 // Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej polskiej, 2010. – 8 s.
6. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska. Baza zanieczyszczeń powietrza: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.opole.pios.gov.pl/stacje/stacje.php>.
7. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Katowicach. Raporty o stanie środowiska w województwie Śląskim: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.katowice.pios.gov.pl/index.php?tekst=monitoring/raporty/i>.
8. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska we Wrocławiu. Monitoring jakości powietrza: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.wroclaw.pios.gov.pl/index.php?id=monit&sub=pow>.

*Поступила 14.02.2013р.*